



TITLE:

高温超伝導マグネットの粒子加速器  
器応用に向けた交流損失および遮  
蔽電流磁界に関する研究(  
Abstract\_要旨)

AUTHOR(S):

曾我部, 友輔

---

CITATION:

曾我部, 友輔. 高温超伝導マグネットの粒子加速器応用に向けた交流損失および遮蔽電流磁界に関する研究. 京都大学, 2019, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2019-01-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k21463>

RIGHT:

許諾条件により本文は2020-01-22に公開

京都大学	博士（ 工学 ）	氏名	曾我部 友輔
論文題目	高温超伝導マグネットの粒子加速器応用に向けた交流損失および遮蔽電流磁界に関する研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、粒子加速器用高温超伝導マグネットを対象として、交流損失および遮蔽電流磁界の評価のための電磁界解析モデルを考案し、それを応用して、交流損失特性、遮蔽電流磁界の振る舞いと遮蔽電流による磁界精度低下対策について研究した結果をまとめたものであって、8章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、背景となる粒子加速器の歴史と高温超伝導マグネット応用の利点と課題を整理している。課題のなかでも交流損失の低減や遮蔽電流磁界による磁界精度低下の克服が高温超伝導マグネットの粒子加速器応用に向けた重要な課題であることを指摘し、課題解決のための数値電磁界解析による電磁現象予測の必要性を論じている。</p> <p>第2章では、高温超伝導線ならびに高温超伝導マグネットの電磁特性と電磁現象についての基礎的知見を整理している。高温超伝導線の非線形な導電特性の定式化方法、さらに、交流損失および遮蔽電流磁界について説明し、粒子加速器用高温超伝導マグネットの交流損失や遮蔽電流磁界の振る舞いが他の高温超伝導マグネットのそれらと異なる点を指摘している。</p> <p>第3章では、有限要素法を用いた高温超伝導線の三次元電磁界解析について、電流ベクトルポテンシャル法と薄板近似を用いた定式化について述べ、その離散化及び求解方法を示している。さらに、高温超伝導マグネット全体を対象とした場合のような、自由度が100万を超えるような大規模問題の解析手法について述べている。加えて、二次元モデルで十分な精度の議論が可能な場合の解析手法についても言及している。</p> <p>第4章では、第3章で導入した高温超伝導線を対象とした電磁界解析モデルを高温超伝導マグネット全体に適用するために必要となる高温超伝導マグネットの近似手法について検討している。単純な形状のコイルを対象とした解析により、その妥当性を評価し、その結果、それらの近似を行っても十分な精度で粒子加速器用マグネットの電磁界解析が行えることを示している。また、近似を導入したモデルによる交流損失計算結果と実験結果を比較し、近似の妥当性を確認している。</p> <p>第5章では、第3章、第4章で述べた電磁界解析モデルを用いて粒子加速器用高温超伝導マグネットの交流損失について論じている。対象として、重粒子線がん治療装置の回転ガントリー用に設計した高温超伝導マグネットを取り上げ、回転ガントリーにおける励磁パターンを模擬したパターンでマグネットを励磁した際の交流損失を評価している。マグネット全体の熱負荷は小型冷凍機で十分冷却できる程度の大きさであり、回転ガントリー用の伝導冷却高温超伝導マグネットが交流損失の点からは十分成立し得ることを示している。さらに、マグネットの内部における交流損失の空間分布について調べ、マグネット内層のコイルの上下中央面付近の超伝導線に交流損失が集中することを明らかにし、高温超伝導マグネットの熱暴走回避の点から、このことを考慮した冷却設計の重要性を指摘している。加えて、高温超伝導マグネットにおける交流損失低減のひとつの方法である臨界電流のグレーディング、すなわちマグネットを構成する要素コイルの臨界電流を変化させる方法について電磁界解析により検討</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	曾我部 友輔
<p>している。その結果、過度なグレーディングはグレーディングした要素コイル間の相互作用により交流損失を増やしてしまう可能性があることを指摘している。</p> <p>第6章では、高エネルギー物理学研究用粒子加速器のマグネットのような直線部の長いマグネットを対象とし、遮蔽電流磁界の磁界精度への影響について議論している。はじめに、Cosine-theta 型マグネットと Block-design 型マグネットの二次元断面設計を行い、それぞれのマグネットにおける遮蔽電流磁界が磁界精度に与える影響を二次元断面内における電磁界解析により比較検討している。その結果、Cosine-theta 型マグネットは Block-design 型マグネットよりも高次多極磁界成分に対する遮蔽電流磁界の影響が小さいことを示している。また、マグネットを構成する高温超伝導線の負荷率が低い領域、すなわち通電電流が低い領域では相対的に遮蔽電流磁界の磁界精度への影響が増大することを示している。続いて、Cosine-theta 型マグネットを対象に回転ガントリ模擬パターンで励磁した際の磁界の再現性と時間安定性について調べ、実用上問題ない水準であることを明らかにしている。最後に、コイルエンド部を考慮した三次元電磁界解析を行い、直線部が長いマグネットにおいては二次元断面内電磁界解析でも遮蔽電流磁界の影響を十分議論できることを確認している。</p> <p>第7章では、回転ガントリ用のマグネットを例にとり、直線部の短いマグネットにおける遮蔽電流磁界の振舞いについて三次元電磁界解析により議論している。はじめに、磁界補正を加えない場合には、コイルエンド部及びコイルエンド部に近い位置の直線部における遮蔽電流によって磁界精度が乱され、要求磁界精度を満たすことが困難になることを指摘している。そのような指摘を踏まえ、遮蔽電流磁界の影響が大きく補正が必要な2極磁界成分と6極磁界成分について、2極コイルの通電電流制御と補正用6極コイルの導入により、それぞれ補正する方法を提案し、その効果を電磁界解析により評価している。まず、遮蔽電流磁界による2極磁界成分の誤差については、2極コイルに流す電流を制御する通電電流制御により遮蔽電流磁界も含めた全磁界が所望の磁界になるように補正できることを示している。次に、遮蔽電流磁界による6極磁界成分の誤差については、銅線で巻いた補正コイルは大きくなり過ぎ実装が困難であることを指摘し、その代わりに、高温超伝導線で巻いた補正用6極コイルを用いることを提案している。補正用6極コイル自身に流れる遮蔽電流の影響や補正用6極コイルが発生する磁界が2極コイルに誘導する遮蔽電流の影響は十分小さいことを明らかにし、補正用6極コイルに流す電流を適切に設定することにより、6極磁界成分の誤差も十分抑制できることを見出している。</p> <p>第8章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、粒子加速器用高温超伝導マグネットを対象として、交流損失および遮蔽電流磁界の評価のための電磁界解析モデルの考案、それを応用した、マグネットの交流損失特性や遮蔽電流磁界の振る舞いの解明、さらには、遮蔽電流磁界による磁界精度低下の克服を目的に研究した成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. 電流ベクトルポテンシャル法と薄板近似に基づいた超伝導線の電磁界解析モデルに入れ子近似・ブロック近似を導入し、実用的な計算時間で加速器用マグネットの超伝導コイルの電磁界解析を可能とする理論モデルを構築した。
2. 構築した理論モデルを用いて、回転ガントリー用高温超伝導マグネットの交流損失の定量化に成功し、同マグネットが、交流損失の点からは十分成立し得ることを明らかにした。また、局所的な交流損失の集中を考慮したマグネットの冷却設計の重要性を指摘した。
3. 直線部が磁界発生に支配的な役割を果たす直線部の長い加速器用マグネットの場合には、直線部の線材の向き・配置を工夫することにより、遮蔽電流磁界による磁界精度低下を抑制できることを示した。
4. コイルエンドが磁界発生において無視できない直線部が短い加速器用マグネットにおいては、主2極コイルのみで広範囲の負荷率で要求される磁界精度を得ることは困難であるが、高温超伝導線を用いた補正コイルを用いれば広範囲の負荷率で要求される磁界精度が得られることを、回転ガントリー用マグネットを例にとり示した。

以上のように、本論文は、高温超伝導の利点を生かした応用として期待が集まる加速器用高温超伝導マグネットを対象にして、交流損失特性や遮蔽電流磁界の振る舞いを明らかにし、さらに遮蔽電流磁界による磁界精度低下の克服策を提案しており、高温超伝導の加速器用マグネットへの応用に向けて、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成30年12月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。